

氏 名	劉 江 林
生 年 月 日	
本 籍	中国
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	博甲第244号
学位授与の日付	平成10年3月25日
学位授与の要件	課程博士（学位規則第4条第1項）
学位授与の題目	変位を評価関数とする構造物の最適形態決定法に関する研究
論文審査委員	（主査）尾田 十八 （副査）梶川 康男, 放生 明廣, 山崎 光悦, 前川 幸次

学位論文要旨

Summary

The paper describes studies on the optimum structural design problems under the displacement conditions. The presented method and the obtained results are given in the brief summaries of four parts as follows.

In part 1, a general theory of maximum stiffness design of elastic beams subjected to a given volume is proposed. Determination of the maximum stiffness of a beam, with the height taken as an independent variable, can be treated as the *Bolza* problem. The beam is taken to be symmetrical about its centerline. The obtained theory can easily be extended to take account of variable width or section area of the beam, by defining a control vector \boldsymbol{u} . An illustrative application is presented in cases of cantilever and simple beam designs subjected to a restriction of the lower bound under an arbitrary external load.

In part 2, a technique to obtain homologous truss structure using genetic algorithm(GA) is proposed. Namely, the structural arrangement and node coordinates are considered simultaneously as the design parameters. Homologous feature and other mechanical character of the structure are expressed as one objective function to obtain its minimum value. This technique is applied to a six nodes truss. From the results it is obvious that the proposed method is efficient and the layout problem of homologous structure is very complicated combinatorial one.

In part 3, a new technique for optimum rib layout in plate and shell structures is presented using GA. In the technique, the design model is discretized into bending plate elements. Element thicknesses such as t_{plate} and t_{rib} for plate and rib elements correspond to GA genes 0 and 1, respectively. The chromosomes of GA are arranged in a matrix and have block crossover process between the blocks of 3×3 genes. To avoid rib element concentration, this block is subjected to several constraints.

According to the strain energy density of elements, a local rule is formulated. Using this local rule, manipulation among genes can progress and convergence is rapid while the reliability of the GA is simultaneously improved. In this technique, the rib elements can be placed in optional positions. According to the connection of rib elements, optimal stiffener can be obtained without any special assumptions.

In part 4, a principle by which the ribs are formed in a leaf of tree is applied to resolve the problem of stiffeners in plate and shell structures. The generalized cellular automaton is used to form a structure shape and the genetic algorithm evolves the parameters. The effectiveness of this method is confirmed through the numerical examples of the minimum compliance design problem of thin plates. Traditional constraint conditions such as the maximum plate thickness, plate volume and so on can be omitted by taking the ratio between the biggest deflection of plate with the stiffener and the corresponding deflection of uniform thickness plate under the equivalent volume as the objective function. The obtained optimum solutions are very similar to the leaf ribs and the shapes with more degrees of freedom.

機械や構造物を設計しようとする場合、その構造形態決定過程は、通常の設計においては概念設計に属し最も創造的で、数値的取り扱いや自動決定の困難な過程で有効な手法が存在しないのが現状である。本研究ではこのような問題に対し、生態系をアナロジーした手法を応用することを考える。具体的には、変位を評価関数とする構造物の力学的な性質を考慮し、これを生態系をアナロジーした手法に加えることにより、手法の信頼性と収束性を図り、その最適形態決定法について検討する。

本論文では、まず、はりの最大剛性の理論解を始め、次に遺伝的アルゴリズムを用いた離散変数と連続変数とが混在したホモロガス構造の位相決定について検討する。また、遺伝的アルゴリズムの染色体を2次元に拡張して薄板補強リブの形状決定問題へ応用する。さらに、ニューラルネットワークをセルラ・オートマトンに加え、薄板補強リブの形態決定問題への有効性について検討する。その要旨は以下に示すとおりである。

第1章では、簡単に構造物の形態決定法に関する研究の歴史、現状および本論文の構成を述べている。

第2章では、はりの最大剛性設計問題を *Bolza* 問題と見なし、体積を制約条件

とするはりの内部に蓄えられたひずみエネルギーを最小にすることで最大剛性ばりの形状決定の理論解を導く。次に、断面高さ、断面幅、断面積をそれぞれ設計変数とするときのはりの最適形状、最大応力とはりの形状などの関係について述べる。また、この理論を用い、自重を無視して外部荷重のみを考慮する静定ばりの最小断面積を制約条件とする最大剛性形状を数値解析を行わずに導出している。

第3章では、近年注目されてきている遺伝的アルゴリズムを用い、離散変数と連続変数とが混在している問題の最適化手法を提案する。遺伝的アルゴリズムとは、自然進化に見られる幾つかの過程を模倣して構築されたアルゴリズムである。生物進化を動かしてきている機構は完全に理解されているわけではないが、その特徴の幾つかは明らかになっている。進化は染色体 (Chromosome)、すなわち生物の構造を符号化した有効な記号上で生じる。符号化された染色体は組み合わせ最適化問題の解の1組と考えられる。また、数学的に多少工夫をすれば、離散値も連続値も表現できる。このように問題としている変数を符号化した染色体を生物の染色体のように進化させれば、最適な染色体が得られるであろう。ある環境下で最適な染色体を持つ生物が最適状態となっていると考えられるように、最適な染色体を持つ機械や構造物は最適解が得られているはずである。具体的な設計例として変位モードを指定したトラス構造の位相決定と寸法決定を同時に行う問題を取り上げ、提案した手法の有効性を明らかにする。また、それらの結果から、ホモロガス性を満足する位相を予想し、部材断面積のみを設計パラメータとして、ホモロガス性を満足し、かつ軽量化された構造を求めることができた。これらの結果から、ホモロガス性を満足する構造は、一般に非常に多く存在するものであることが確認され、従って、それを特定するには、重量等の他機能を与えることが必要なことも分かった。

第4章では、遺伝的アルゴリズムの通常の1次元的な染色体を2次元に拡張し、遺伝情報を伝える染色体と2次元的な薄板補強リブの最適化問題を対応させる。このような2次元的な染色体を使用することにより、コーディングや制約条件を容易に満足させることができ、また、致死遺伝子を抑制することになる。さらに、局所的な性質を保つままのブロック交叉を用いることにより、交叉の過程におい

てスキマタの破壊が抑えられる。つまり、薄板を有限要素法の要素に分割し、各要素の位置に関する情報と2次元染色体の遺伝的アルゴリズムの遺伝子を対応させる。このようにして有限要素法と遺伝的アルゴリズムを組合せることで、補強リブの最適配置を求めることができる。さらに、薄板の力学的な性質を考慮し、遺伝的アルゴリズムの遺伝子間に簡単な設計上の局所ルールを与え、その情報により、遺伝子操作を有効に行い、遺伝的アルゴリズムの信頼性と収束性を図ることも考えた。数値例を通してこれらの手法の有効性を明らかにした。また、数値解析においてリブの体積を変化させ、リブ体積と板体積、リブ位相とその寸法などの関係を明らかにした。

第5章では、木ノ葉の葉脈の形成する現象を模倣し、より自由度のある薄板補強リブの最適形態を求めることを考える。つまり、木ノ葉は光合性のため、ある程度の大きさと厚さを必要としているが、ほかには何の制約もないようである。栄養さえ十分に提供されれば、どのような形態でも形成される。もちろん、葉脈の機能にはいろいろあると思われるが、葉自身の形態保持、つまりその剛性を増加させることもあると思われる。なぜ木ノ葉は全域的に板厚を変化させず、葉脈を形成しているのでしょうか、またその葉脈はなぜかなり太いものから細いものまでに変化しているのでしょうか、これらの点を解明すれば、人工構造物である薄板、シェルの剛性設計に貢献できると考えられる。そこで、本章では、木ノ葉を力学的なモデルに単純化し、ニューラルネットワークをセルラ・オートマトンに加えた手法を用い、薄板補強リブ形態の最適化を図る。つまり、セルラ・オートマトンによって要素の板厚を変化させるもので、最大と最小閾値を遺伝的アルゴリズムによって求めるものである。ここではまず、解析モデルを粗く分割し、最適解を求めた。次に、解析モデルを細かく分割し、前の解析で得られた最適解を初期状態にし、大規模な最適化問題を解くという2段階の手法を試みた。また、有限要素法の解析で得られた補強リブ付き薄板の最大変位とその等価体積の一樣厚さの板の最大変位の比を遺伝的アルゴリズムの適応度とすることで、薄板の体積、最大板厚などの制約条件を無くし、より自由度のある最適解を求めることができた。数値例を通して本手法の有効性を確認し、次の結果を得た。

- (1) 構造物の最適形態を求めるとき、要素自身の状態のみを考慮するのではなく、その近傍の要素の状態を同時に考慮するセルラ・オートマトン手法が有効である。このとき周辺要素の重みは最適解に与える影響は非常に敏感なものではなく、0.5 から 0.75 までの間に設定したほうが良いことが分かった。
- (2) 薄板を有限個の要素に分割し、かつそれらの最大板厚の制約条件がない限り、最適板厚分布というものが存在せず、最大剛性の薄板は木の葉の葉脈のように補強リブを形成する。
- (3) 中央に集中荷重の作用する周辺単純支持の正方形板では、荷重点から最も近い支持部に向かう十字形の補強リブが作られる場合と、荷重点を中心とするほぼ同心円状のリブと放射状、および最も近い支持部に向かうリブの形成される場合とのあることが分かった。
- (4) 中央に集中荷重の作用する相対する 2 辺が単純支持で他の 2 辺が自由の正方形板では、荷重点から最も近い支持部に向かうリブが形成される。しかもそのリブの高さは中央に集中荷重の作用する単純支持ばりの最適高さとはほぼ一致する。

最後に、第 6 章では本研究の総括を述べている。

学位論文審査結果の要旨

各審査委員が提出論文の審査を行い、平成10年2月3日審査会、同4日口頭発表後、その結果を踏まえてさらに論文審査会を開催し、協議の結果、次のとおり判定した。

本論文は、変位を評価関数とする構造物を対象に、その最適形態の創生法を提案したものである。具体的には数理的手法を用いて、はりの最大剛性解を求める方法の提案、また、生態系をアナロジーした遺伝的アルゴリズムやセルラ・オートマトン手法と有限要素法とを組み合わせた新しい方法を提案している。前者の方法は、はりの最大剛性設計問題を Bolza 変分問題と見なし、その中で蓄えられたひずみエネルギーを最小化することにより、体積を制約条件とする最大剛性ばりの形状決定の理論である。また、後者の方法は変形後も与えられた形態を保つ、いわゆるホモログス構造の創生法として、また、任意の負荷や支持条件の下での薄板の変形を最小化するための補強リブ配置問題の実用的方法として開発された。後者の方法は特に構造物の寸法のみでなく、位相決定法として有効で、そのことは 6 節点トラスのホモログス構造の創生例や集中荷重を受ける四角形板の最適リブ配置の創生例など幾つかの具体的な設計問題を解くことによって、数値的に明らかにされた。さらに、それらの数値結果から構造最適設計法の一般的ルールも導出している。

以上の成果は、構造設計の分野はもちろん、最適化分野などにも極めて有用なものであり、従って本論文は博士（工学）の学位に値するものと判定する。